



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202204077 中图分类号 X511 文献标识码 A

赵文霞, 柴子茹, 边永欢, 等. 农林生物质锅炉烟气排放特性及其 SNCR 脱硝效果的数值模拟[J]. 环境工程学报, 2022, 16(10): 3355-3366.
[ZHAO Wenxia, CHAI Ziru, BIAN Yonghuan, et al. Flue gas emission characteristics and SNCR denitrification numerical simulation of agro-forestry biomass boiler[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(10): 3355-3366.]

农林生物质锅炉烟气排放特性及其 SNCR 脱硝效果的数值模拟

赵文霞[✉], 柴子茹, 边永欢, 赵玉, 王世欣, 焦志杰

河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050018

摘要 以河北省典型生物质发电厂生物质锅炉为研究对象, 在对其农林生物质燃料组成进行分析的基础上, 借助 FLUENT 软件对生物质锅炉烟气排放特性及 SNCR 脱硝性能进行数值模拟。结果表明, 与单一生物质相比, 小麦秸秆、果木枝、树皮 3 种生物质按照 0.3:0.4:0.3 配比构成的农林混合燃料具有更低的 N 含量 (0.39%)。不同生物质燃料燃烧排放的烟气中 NO 平均质量浓度由高到低依次为小麦秸秆 ($503.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) > 果木枝 > 树皮 > 混合燃料 ($369.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$); 排放的 SO₂ 平均质量浓度由高到低依次为小麦秸秆 > 混合燃料 > 树皮 > 果木枝; CO: 树皮 > 小麦秸秆 > 混合燃料 > 果木枝; 排放的 CO₂ 平均质量浓度由高到低依次为混合燃料 > 果木枝 > 树皮 > 小麦秸秆。SNCR 脱硝数值模拟得出, 将还原剂 (尿素) 喷嘴高度设置在 8~11 m、喷嘴数量为 10 个、反应温度约为 900 K、氨氮比为 1.5 时, SNCR 脱硝率最高 (78.7%)、NO 排放浓度最低 ($78.7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。本研究结果表明, 混配的农林生物质燃料具有更好的燃烧性能, 经燃烧产生的 NO 质量浓度最低, 这说明在满足 SNCR 最佳工艺运行参数条件下, NO 更易实现低排放要求。

关键词 生物质燃料; 燃料组成; 烟气组成; 数值模拟; SNCR

生物质能是仅次于石油、煤炭和天然气的世界第四大能源, 具有可再生和环境友好的双重属性^[1-3]。生物质燃料是生物质能最直接的利用方式。随着我国“双碳”目标的提出, 生物质燃料将迎来更广阔的发展空间。尽管生物质燃料具有可再生和环境友好的优势, 但其在锅炉燃烧利用过程中仍会产生一定浓度的烟尘、NO_x 和 SO₂ 等大气污染物^[4]。其中, 因其生成机理复杂、脱硝成本高等因素, NO_x 的治理已成为生物质锅炉烟气治理的重点和难点。针对生物质锅炉烟气大气污染物, 尤其 NO_x 排放进行严格管控具有重要的现实和环境意义。

与实验室研究相比, 数值模拟具有低成本、简单、快捷等优势, 成熟的模拟软件可较准确地描述整个流场参数^[5]。国内外已有学者将数值模拟应用于生物质锅炉研究中。ZHANG 等^[6]利用 FLIC 和 FLUENT 模拟生物质锅炉内的燃烧过程, 发现生物质燃料产生的 CO₂ 和 NO_x 更少, 可通过减少空气量来减少污染物的产生。JAKOV 等^[7]在以生物质、垃圾为燃料的焚烧炉内进行 SNCR 脱硝模拟, 验证了以尿素为还原剂的脱硝效率较好, 计算结果贴合实际情况。SEYED 等^[8]利用数值模拟研究了生物质锅炉烟气 SNCR 脱硝中还原剂氨的喷射高度与流量对其脱硝效果的影响, 其脱硝效率最高可达 63%。我国生物质锅炉方面的研究起步较晚, 且主要借鉴燃煤锅炉。尽管燃煤锅

收稿日期: 2022-04-12; 录用日期: 2022-08-10

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2016YFC0207907); 河北省地方标准制修订项目 (ST202022)

炉烟气脱硝主要采用 SNCR 和 SCR 技术,但由于 SCR 脱硝技术存在投资和运行成本高等不足之处,因此,国内生物质锅炉烟气脱硝普遍采用 SNCR 脱硝技术。胡小翠等^[9]对生物质直燃锅炉燃烧过程进行了模拟计算,通过计算得出的温度场与 NO 分布情况,可为锅炉优化提供参考。李穹等^[10]在进行 SNCR 脱硝模拟时,以尿素作为还原剂,研究了温度、氨氮摩尔比、喷射参数、循环灰等因素对脱硝效果的影响。陆燕宁等^[11]以生物质锅炉为研究对象,通过对锅炉 SNCR 脱硝过程进行模拟计算,优化了还原剂喷嘴的布设形式,以探究最佳氨氮比。

在锅炉烟气中,大气污染物的组成,尤其 NO_x 生成,不仅与锅炉燃烧条件有关,而且与燃料组成特性密切相关。与燃煤不同,生物质燃料来源广,燃料组成特性存在明显差异,因而对生物质燃料组成进行测定,是开展生物质锅炉燃烧、烟气排放特性及烟气脱硝数值模拟的前提。采用数值模拟手段探究生物质燃料组成对锅炉烟气排放特性影响的研究还鲜有报道。

本研究以河北省某生物质发电厂生物质锅炉为研究对象,在对其农林生物质燃料组成进行分析的基础上,借助 FLUENT 软件对生物质锅炉烟气排放特性及 SNCR 脱硝性能进行数值模拟,以期指导农林生物质锅炉企业优选生物质燃料,从而减少生物质锅炉烟气中大气污染物排放浓度。在此基础上,优化 SNCR 工艺的运行参数,可为实现 NO 低排放提供重要的理论基础和数据支持。

1 生物质燃料组成特性

河北省内某典型生物质发电厂采用生物质直燃锅炉,所用的农林生物质燃料主要有小麦秸秆、果木枝、树皮等。3种生物质燃料一般按照 0.3:0.4:0.3 的质量配比混合(称为混合燃料)后直接进入生物质锅炉燃烧。采用本课题组前期研究的分析方法^[12],对生物质燃料的组成及热值进行测定,结果如表 1 所示。

表 1 生物质燃料组成分析结果
Table 1 Analysis results of biomass fuel composition

生物质燃料种类	工业分析/%				元素分析/%					低位热值/(MJ·kg ⁻¹)
	水分(M _{ad})	挥发分(V _{ad})	灰分(A _{ad})	固定碳(FC _{ad})	C	H	O	N	S	
小麦秸秆	9.37	66.38	7.76	16.49	40.25	15.82	36.03	0.50	0.21	14.67
果木枝	7.33	72.40	6.99	13.28	43.81	16.81	38.79	0.54	0.04	9.81
树皮	7.62	78.45	1.23	12.70	43.62	16.96	37.93	0.46	0.05	12.83
混合燃料	8.87	66.14	7.75	17.24	43.12	16.60	37.02	0.39	0.10	13.47

工业分析结果表明,3种生物质燃料的挥发分和固定碳含量高,故生物质燃料普遍具有易点燃、发热量高的特点。其中,树皮的灰分含量最低,因而其燃烧产生的烟尘量最小。从元素分析来看,3种燃料的 C 含量均大于 40%,燃料可燃部分较多。其中,树皮中 N 含量偏低,因而其燃烧过程 NO_x 的理论生成量会偏低,而果木枝中 S 含量偏低,经燃烧会生成较少量的 SO₂。对燃料热值进行分析发现,3种单一生物质燃料热值较高的是小麦秸秆,其热效率较高。与单一生物质燃料相比,混合燃料的固定碳含量略有提高、N 含量有所降低。分析其原因,可能是受燃料结构与特性的影响,不同生物质燃料表现出不同的燃料特性^[13]。因此,在保证一定燃料量的条件下,混合燃料有利于提升生物质锅炉的热效能,并减少污染物排放。

2 生物质锅炉炉膛内模拟燃烧流场分析

2.1 生物质锅炉数值模型的构建

典型生物质发电厂生物质直燃锅炉的基本参数,如表 2 所示。

利用 GAMBIT 软件建立生物质锅炉结构的几何模型。锅炉网格划分数量为 469 060 个，网格划分结果如图 1 所示。将建好的几何模型进行网格划分，属于数值模拟的前处理部分。良好的网格划分是利用 FLUENT 软件进行数值模拟的前提和基础。本研究中进行网格划分后，结果倾斜度低于 0.7，这表明网格划分精良。根据生物质电厂实际运行工况并结合相关文献报道，本研究借助 FLUENT 软件进行数值模拟，对该生物质锅炉内的温度场、烟气组分 (SO_2 、 CO 、 CO_2 、 NO_x) 浓度场进行模拟计算。所采用的模型有：标准 $k-\varepsilon$ 模型、P-1 模型、离散相模型、通用有限速率/涡耗散模型、 NO_x 生成模型等。边界条件如表 3 所示。

生物质锅炉内燃料燃烧反应复杂，根据生物质燃料的工业分析和元素分析结果 (见表 1)，在燃烧反应模拟中进行相关参数设置，具体如图 2 所示。

2.2 温度场

模拟小麦秸秆、果木枝、树皮及混合燃料经锅炉燃烧的过程，其中炉膛内的温度分布场如图 3 所示。锅炉内高温区主要集中在炉膛中心处，温度分布呈现由炉膛中心向周围递减趋势。以树皮为燃料时，炉膛内高温区分布面较高，而果木枝燃烧时高温区分布面最低。经模拟得出，燃烧最高温度分别为：1 173 K、1 097 K、1 216 K、1 140 K。该生物质发电厂实际运行中，以混合生物质为燃料时炉膛内最高温度为 1 180 K。这表明数值模拟结果与实际值相对误差在 4% 以内，说明本研究选择的燃烧模型适用于该锅炉的实际情况。温度对生物质锅炉烟气的生成与结渣形成有一定影响。一般而言，随着温度的升高，燃料中 C 和 N 元素经充分燃烧后 CO_2 和 NO_x 的生成量增加；但温度过高时， CO_2 和 NO_x 会发生部分还原反应，其中部分 CO_2 还原成 CO 、部分 NO_x 还原成 N_2 。此外，生物质中微量金属元素在高温下会发生氧化反应，易形成部分结块而附着在锅炉表面上^[14]。尽管以混合生物质为燃料的炉内温度并不比以树皮为燃料的高，但就炉内发生的燃烧化学反应而言，采用混合生物质燃料则会减少由于炉内过高温而引发的烟气组分还原反应。

2.3 烟气组分的质量浓度分布场

2.3.1 NO 的质量浓度场

在生物质锅炉烟气中， NO_x 主要以 NO 为主，而锅炉内 NO 的来源主要来自于燃料型 NO 。经

表 2 生物质锅炉基本参数

Table 2 Basic parameters of biomass boiler

参数	单位	数值
锅炉尺寸	m	16×9.2×30.6
炉膛高度	m	18
额定蒸汽量	$\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	130
最大蒸汽量	$\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	140
炉膛出口烟温	$^{\circ}\text{C}$	770
锅炉效率	%	89
锅炉负荷	%	100

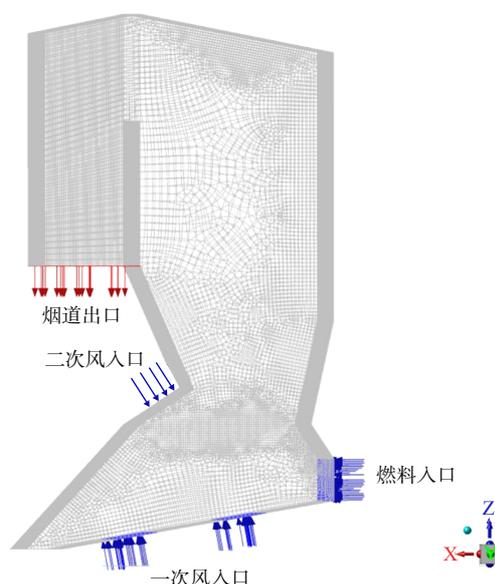


图 1 生物质锅炉炉膛网格划分简图

Fig. 1 Biomass boiler furnace grid division diagram

表 3 边界条件参数设置

Table 3 Boundary condition parameter setting

参数	单位	数值
一、二次风温	$^{\circ}\text{C}$	195
一、二次风速	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	8.1
燃料量	$\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	35.9
生物质燃料温度	$^{\circ}\text{C}$	20

燃烧后，生物质燃料中的 N 元素转化成 HCN 与 NH₃。炉膛中发生了一系列反应，如式 (1)~式 (4)^[15]所示。

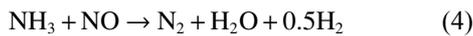
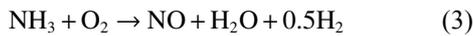
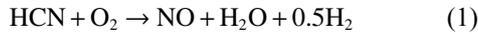


图 4 中各生物质燃料的 NO 分布状况表明，不同生物质燃料燃烧产生的 NO 状况大致相近，且 NO 主要分布在炉膛顶部与烟道出口之间。NO 的平均质量浓度由高到低依次为：小麦秸秆 (503.6 mg·m⁻³) > 果木枝 (466.3 mg·m⁻³) > 树皮 (378.6 mg·m⁻³) > 混合燃料 (369.2 mg·m⁻³)。其中，小麦秸秆的局部 NO 质量分数高达 654.7 mg·m⁻³。该电厂实际运行以混合生物质为燃

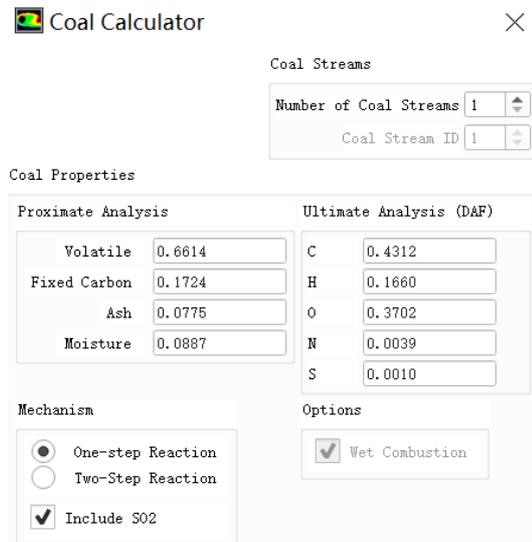


图 2 燃烧模型燃料参数设置

Fig. 2 Fuel parameter setting of combustion model

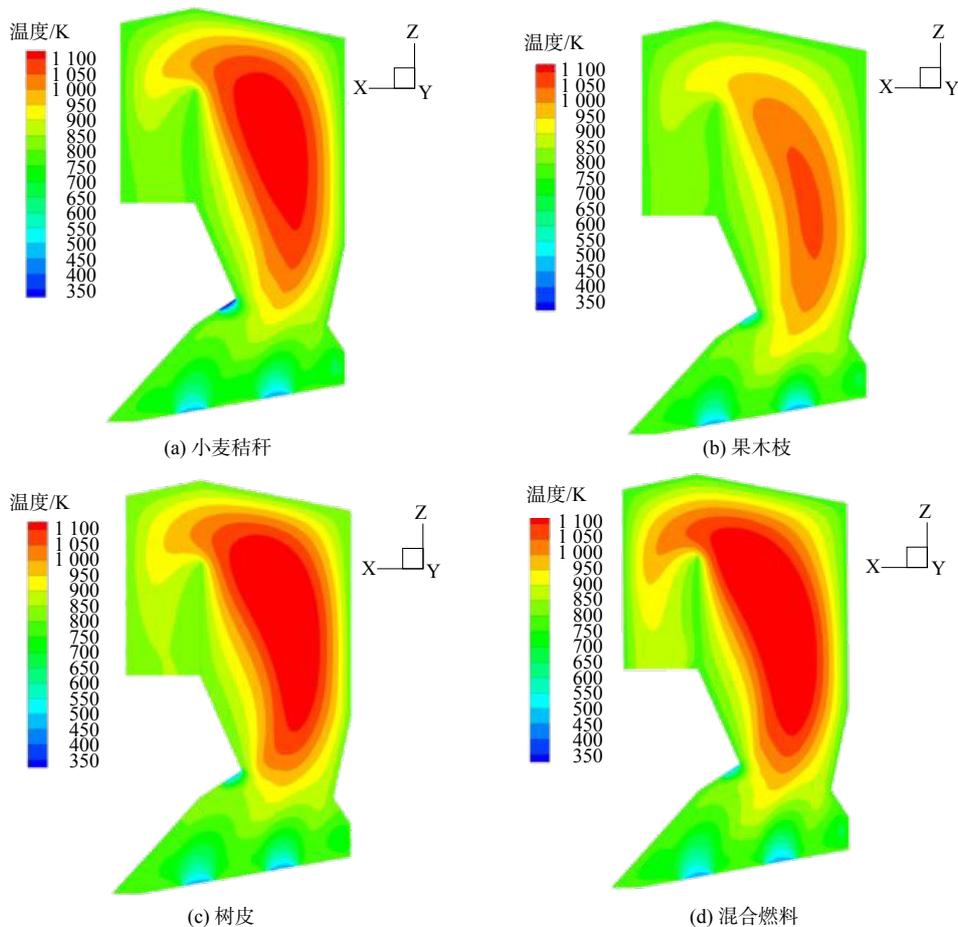


图 3 不同生物质燃料在炉膛 y=4.6 截面处的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution diagram of different biomass fuels at y=4.6 section of furnace

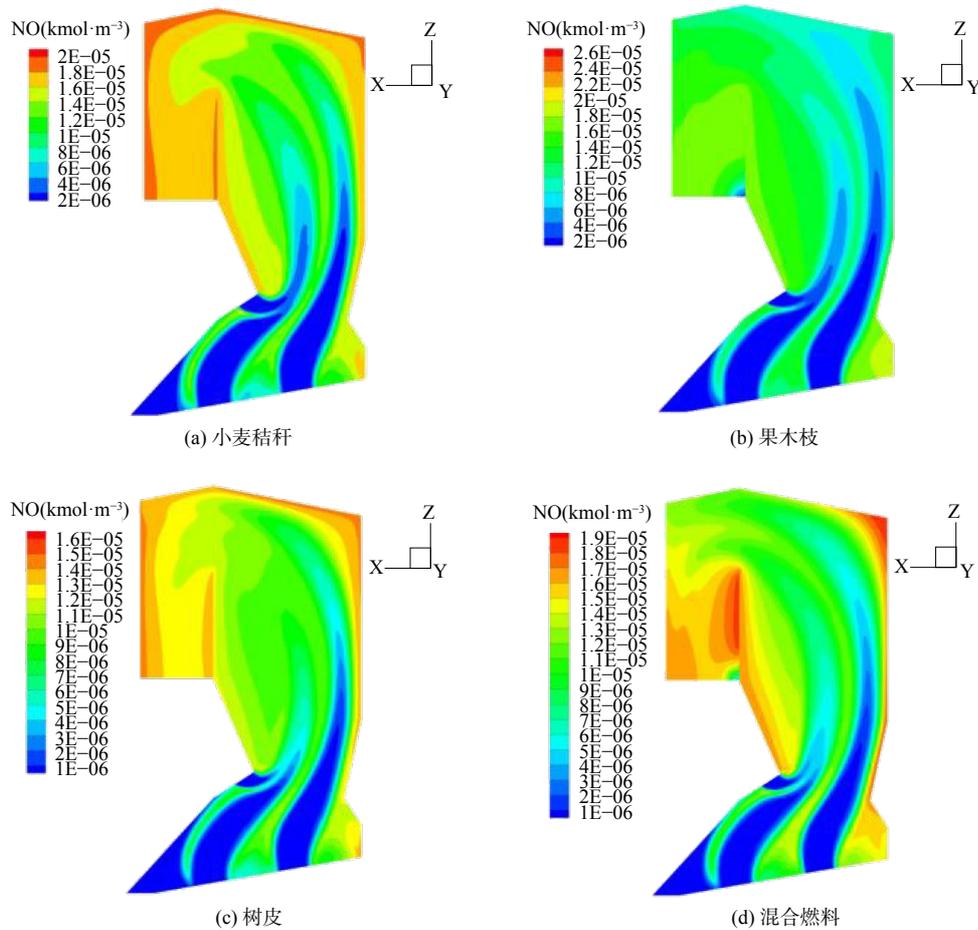


图 4 不同生物质燃料在炉膛 $y=4.6$ m 处 NO 的质量浓度分布

Fig. 4 NO concentration distribution diagram of different biomass fuels at $y=4.6$ m in the furnace

料，锅炉排烟中的 NO 质量浓度为 $390\sim 400\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这表明数值模拟结果与实际值相对误差在 8% 以下，进而验证了模型和参数选择的合理性和准确性。结合元素分析结果 (表 1) 分析发现，混合生物质燃料中 N 元素含量低于单一生物质燃料，其燃烧后 NO 的生成量最少，因此，燃料中 N 元素含量与 NO 生成量一般呈正相关关系。而对于单一生物质燃料而言，尽管果木枝 N 元素含量略高，但其 NO 生成量反而低于小麦秸秆。推测其原因可能在于，果木枝中 N 向挥发分 N 的转化不如小麦秸秆，而部分 N 会形成焦炭 N。

2.3.2 SO_2 的质量浓度场

在生物质燃料中，S 元素经燃烧后主要转化成 SO_2 ，少部分 S 元素与其他碱金属发生化学反应形成结渣附着在锅炉炉壁内。经过模拟计算后 (图 5)，烟道出口处 SO_2 的平均质量浓度由高到低依次为：小麦秸秆 ($107.0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) > 混合燃料 ($62.8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) > 树皮 ($43.4\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) > 果木枝 ($44.4\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。这表明由于生物质燃料中 S 元素含量较低 (见表 1)，生物质燃料燃烧排烟中 SO_2 普遍偏低。相比而言，以农作物小麦秸秆为燃料排放的 SO_2 质量浓度要远大于结构为木质的树皮、果木枝排放的 SO_2 。不同生物质经过混合后，排放 SO_2 质量浓度没有明显降低。这表明不同种类农林生物质燃料的混合对于 S 元素向 SO_2 的转化并没有显著影响。

2.3.3 CO 的质量浓度场

CO 质量浓度表示生物质锅炉炉膛是否燃烧完全。由模拟计算可得 (如图 6 所示)，不同生物质燃料燃烧排放的 CO 平均质量浓度由高到低依次为：树皮 ($650\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) > 小麦秸秆 ($515.9\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) > 混

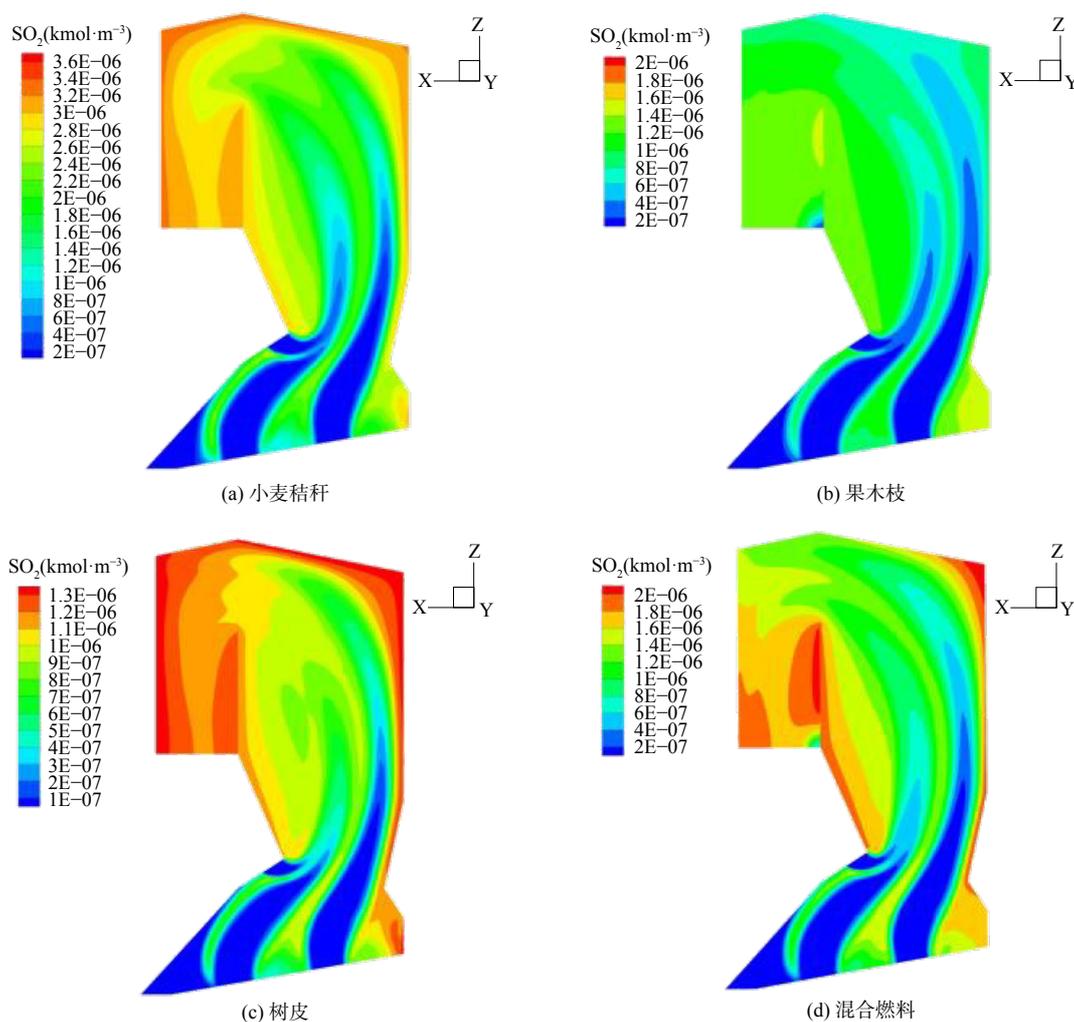


图5 不同生物质燃料在炉膛 $y=4.6\text{ m}$ 处 SO_2 的质量浓度分布

Fig. 5 SO_2 concentration distribution of different biomass fuels at $y=4.6\text{ m}$ in the furnace

合燃料 ($324.9\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) > 果木枝 ($256.8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。对比可知, 树皮在锅炉内燃烧不完全, 在以树皮为主要燃料的生物质锅炉中, 局部 CO 质量浓度高达 $6.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。因此, 为达到相同热能时, 需消耗更多树皮。而混合燃料的 CO 质量浓度有所降低, 与果木枝排放 CO 质量浓度相近。这表明不同种类生物质混合燃烧时, 不同组分相互作用可促进燃烧, 使得燃烧更完全。由图6可知, CO 主要分布在一次风、二次风风速流动小的区域, 以及炉膛高温区。 CO 是 C 元素不完全燃烧的产物, 燃料在炉膛内堆积程度过高就会导致燃料不充分燃烧。在高温时, 生物质燃料的燃烧剧烈, 会消耗大量氧气与析出的挥发分, 从而导致炉膛内 CO 质量浓度增加。在炉膛顶部至烟道出口处燃料的燃烧充分, 因此, 导致 CO 质量浓度降低。此外, CO 在锅炉内为还原气氛, 在燃烧过程中与烟气中的 NO 会发生还原反应。其中, 发生的主要反应如式(5)所示^[16]。



综上所述, 生物质锅炉内适当含量的 CO 有助于降低锅炉烟气中 NO 含量, 同时对锅炉效率的提升有一定意义。

2.3.4 CO_2 的质量浓度场

在生物质燃料中, C 元素占主要部分。经燃烧后, 生物质燃料中的 C 元素主要以 CO 和 CO_2 的

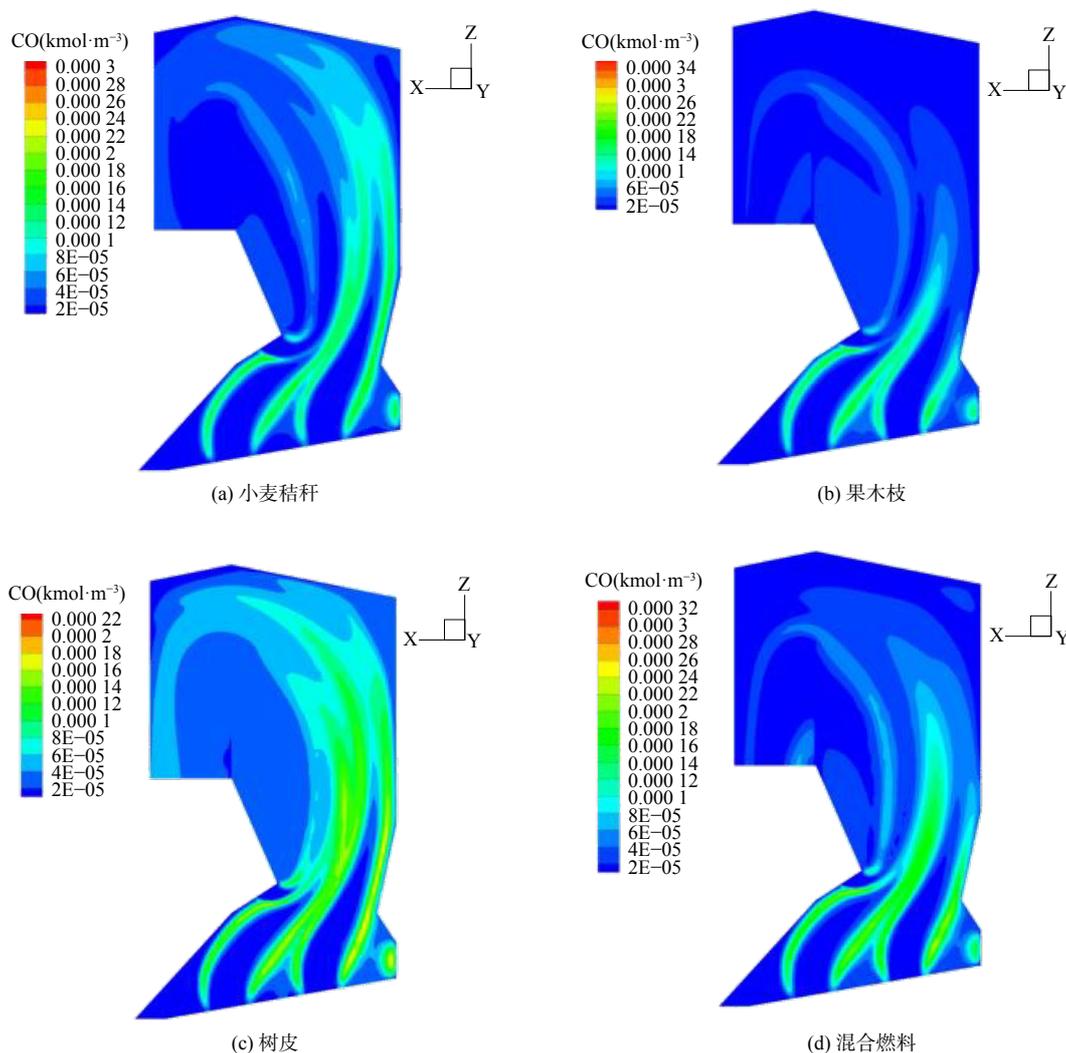


图 6 不同生物质燃料在炉膛 $y=4.6\text{m}$ 处 CO 的浓度分布图

Fig. 6 CO concentration distribution of different biomass fuels at $y=4.6\text{m}$ in the furnace

形式存在于烟气中。在氧气充足条件下，C 元素主要转化成 CO_2 ；在氧气不充足或高温条件下 C 元素主要转化成 CO。图 7 表明，烟气中 CO_2 主要分布于炉膛中心到烟道出口处，受炉膛内烟气流动影响，而一次风、二次风风口处及燃料入口处的 CO_2 质量浓度较低。这主要是由于风口处流速较大、燃料入口处氧气不充分，导致燃烧反应不完全。燃料在炉膛顶部与烟道出口间的燃烧更剧烈，故生成的 CO_2 更多。经模拟计算得到，不同燃料排放的 CO_2 平均质量浓度由高到低依次为：混合燃料 ($27.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 果木枝 ($23.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 树皮 ($23.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 小麦秸秆 ($22.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)。在混合燃料燃烧时，C 元素转化为 CO_2 的几率较高，局部 CO_2 的质量浓度高达 $59.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。因此，混合生物质燃料的燃烧效果优于单一燃料。尽管现行的锅炉大气污染物排放标准未对 CO_2 给出排放限值要求，但随着“双碳目标”的提出，提升锅炉热效能、降低碳排放必将成为生物质能利用行业亟待解决的一个重要课题。

2.3.5 不同生物质燃料烟气组分质量浓度的比较

模拟不同生物质燃料在锅炉内的燃烧，炉膛内不同烟气成分的质量浓度对比如图 8 所示。NO 是生物质锅炉排放烟气的主要污染物，是生物质锅炉烟气监测与治理领域关注的重点。对比结果表明，不同生物质按比例混合燃烧后可有效减少 NO 的排放；混合燃料排放的 CO 质量浓度较

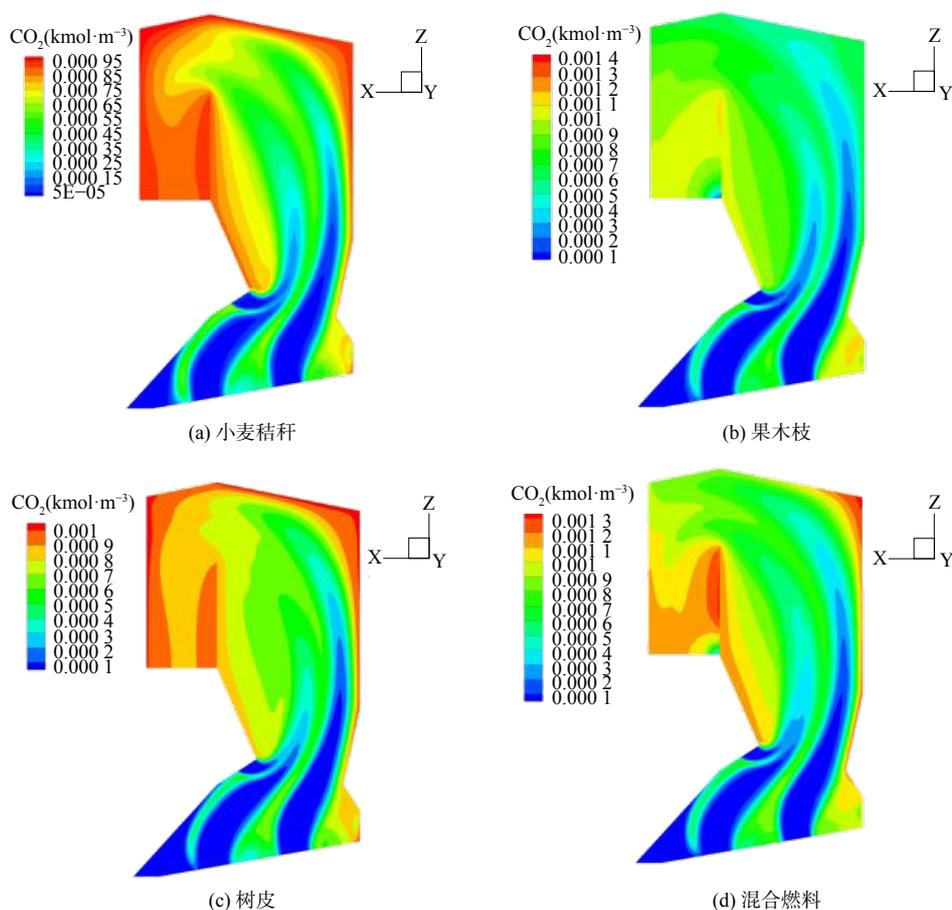


图7 不同生物质燃料在炉膛 $y=4.6\text{m}$ 处 CO_2 的浓度分布图

Fig. 7 CO_2 concentration distribution of different biomass fuels at $y=4.6\text{m}$ in the furnace

低, CO_2 质量浓度最高。这说明混合燃料在炉膛内燃烧较完全, 燃烧效果较好, 有利于提升锅炉热效率。此外, 混合燃料对 SO_2 的排放影响较低, 其质量浓度介于小麦秸秆与果木枝、树皮之间。在生物质锅炉企业中, 通过一系列脱硫工艺可有效降低 SO_2 的排放。在实际应用中, 混合燃料能在提升锅炉热能时减少 NO 的排放, 因此, 在大多数生物质锅炉企业中混合燃料被广泛应用, 还需进一步开展不同种类燃料配比的探究。

3 生物质锅炉 SNCR 烟气脱硝的数值模拟

结合企业实际生产, 该企业生物质锅炉 SNCR 烟气脱硝采用尿素为还原剂, 涉及的主要化学反应式如式 (6)~式 (10) 所示^[17]。以尿素为还原剂的 SNCR 反应十分复杂, 尿素分解生成的 NH_3 和 HNCO , 各自还会发生还原反应。在实际过程中, 以 NH_3 作为还原剂来主导 SNCR 脱硝反应, 以 HNCO 作为还原剂辅助促进脱硝效率的提升^[18]。在此基础上, 选取 NO_x 模型中的 SNCR 模型进行模拟计算, 以此来探究 SNCR 中还原剂喷嘴布设、反应温度、氨氮比对脱硝效果的影响。



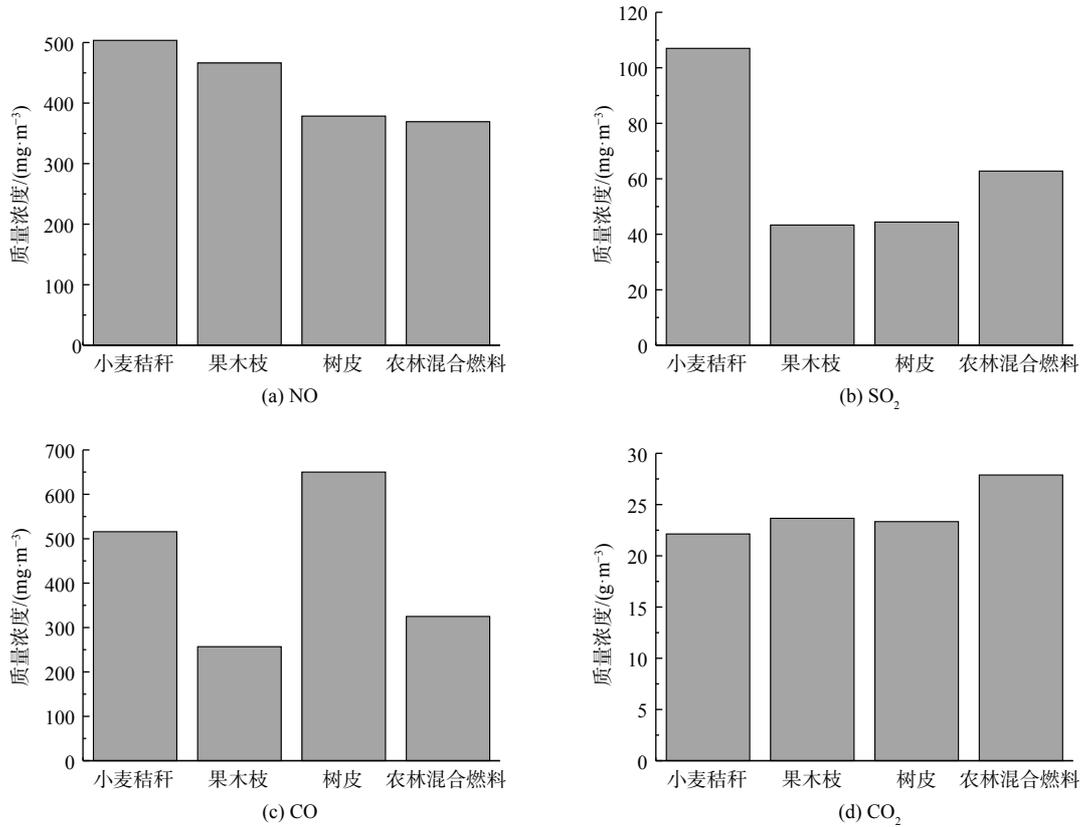
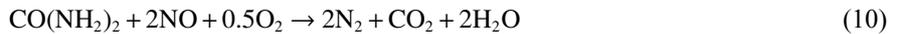


图 8 不同生物质燃料在炉膛内烟气组分浓度对比图

Fig. 8 Comparison diagrams of flue gas component concentration of different biomass fuels in furnace



3.1 喷枪的影响

还原剂喷嘴的位置会在一定程度上影响生物质锅炉的烟气脱硝效率。本研究设置条件为：还原剂雾化粒径为 1 μm 、雾化角度为 30°；还原剂注入温度为 300 K；还原剂供给速度 6~7 m·s⁻¹；还原剂用量 0.0139 kg·s⁻¹。生物质锅炉炉膛高度为 18 m，分别在炉膛高度为 z=8 m、9.3 m、10.6 m、12 m 和 13.6 m 处布设还原剂喷嘴。由图 9 可知，烟道出口处 NO 的质量浓度会随着还原剂喷嘴布设高度的增加呈现出先降低后上升的趋势。还原剂喷嘴高度在 z=9.3 m 左右时，烟道出口 NO 质量浓度为 105.7 mg·m⁻³，此时脱硝效果更好。还原剂喷嘴在 z=13.6 m 处时，出口 NO 质量浓度为 110.6 mg·m⁻³，此时脱硝效果不佳。受炉膛内温度场与烟气组分质量浓度分布场的影响，还原剂喷嘴布设位置应接近炉膛中 NO 生成位置会更有利于脱硝反应，并提升锅炉脱硝效率。在炉膛 z=13.6 m 处接近炉膛顶部的位置，这时受炉膛内烟气流动场的影响，喷嘴在炉膛顶部在注入还原剂时受烟气流动方向与

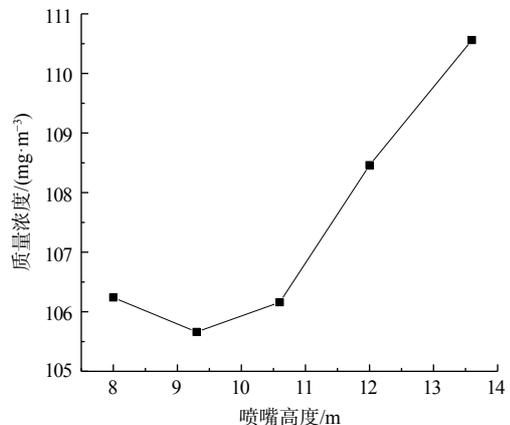


图 9 还原剂喷嘴高度与烟道出口处 NO 浓度关系图

Fig. 9 Diagram of relationship between reducing agent nozzle height and NO concentration at flue exit

速度未能充分反应、混合程度较差,易造成还原剂逃逸现象。而从炉膛 $z=9.3$ m 处附近注入还原剂,还原剂会随着炉膛内烟气的流动遍及炉膛内,延长了还原剂在炉膛内的停留时间,使得还原反应更充分,混合程度也优于炉膛顶部。同时,还原剂喷嘴在炉膛高度 8~11 m 处的脱硝效果相近,因此,还原剂喷嘴布设高度区间以 8~11 m 为宜。

喷嘴数量与还原剂的用量呈正相关关系。喷嘴数量越多则还原剂用量会越多,在一定程度上可影响还原剂与烟气的混合程度^[19],故脱硝效率就容易提升。但喷嘴数量的增加运行费用也随之增加,因此,应设计好适量的喷嘴数量,以求得脱硝效率与运行费用达到最佳平衡。模拟条件设置为:还原剂雾化粒径为 $1\ \mu\text{m}$,雾化角度为 30° ,还原剂注入温度为 300 K,还原剂供给速度 $6\sim 7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,还原剂用量 $0.0139\ \text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。设置喷嘴数量为 4 支、6 支、8 支、10 支、12 支。由图 10 可知,随着还原剂喷枪数量的增加,烟道出口处的 NO 质量浓度逐渐降低。当喷枪数量由 4 个增加至 6 个时,NO 质量浓度由 $117.7\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 $90.7\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。NO 质量浓度的降低幅度较大说明了喷枪数量的增加对 NO 脱除效果显著。然而,喷枪数量从 10 个增至 12 个时,烟道出口处 NO 质量浓度降低趋势减缓。喷嘴烟道出口处 NO 质量浓度从 $78\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 $75.9\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,锅炉内脱硝效率最高达 79.4%。根据河北省《锅炉大气污染物排放标准》(DB13/5161-2020)中生物质锅炉 NO_x 排放标准低于 $80\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。因此,在保证运行成本的条件下,将还原剂喷嘴数量设置为 10 个。

3.2 温度的影响

烟气中的 NO 还原是在特定温度下进行的。温度过高,会使部分还原剂氧化成 NO_x ; 温度过低,反应速率降低则会造成大量还原剂逃逸^[20]。由于生物质锅炉炉膛温度偏低,一般达不到 SNCR 工艺所需的反应温度。因此,在实际运行中,通过提高还原剂供给速度,以提升还原剂与 NO 的反应速度,使得还原剂在低于 1000 K 的温度内仍可达到较高的脱硝效率。此外,将还原剂的雾化粒径设置在 $40\ \mu\text{m}$ 以下,增强还原剂与 NO 的充分反应性,进而提升脱硝效率。设置模拟条件为:还原剂雾化粒径为 $1\ \mu\text{m}$,雾化角度为 30° ,还原剂注入温度为 300 K,还原剂供给速度 $6\sim 7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,还原剂用量 $0.0139\ \text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。探究反应温度窗口为 750~1100 K 时,烟道出口 NO 的质量浓度变化。由图 11 可知,随温度的增加炉膛内脱硝效率呈先上升后下降的趋势,氨逃逸量随着温度的增加呈下降趋势。当脱硝效率在 70% 以上时,生物质锅炉 SNCR 脱硝工艺的温度窗口为 750~950 K。当生物质锅炉的反应温度分别处于 850 K、900 K 时,烟道出口 NO 的质量浓度分别为 $78\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $76.8\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,脱硝效率可达 78% 以上。而此时该生物质锅炉的氨逃逸量较小,还原剂逃逸量低于 $3\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。当温度为 850~950 K 时,氨逃逸量下降幅度明

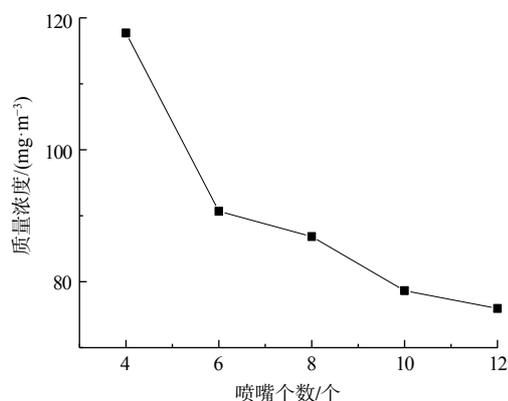


图 10 喷嘴数量与烟道出口处 NO 质量浓度的关系
Fig. 10 Diagram of the relationship between the number of nozzles and NO concentration at flue exit

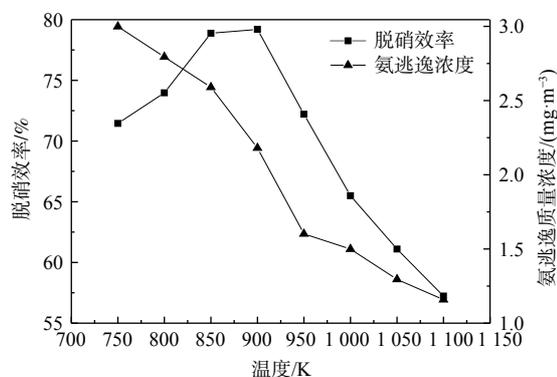


图 11 反应温度对脱硝率和氨逃逸的影响
Fig. 11 Effect of reaction temperature on denitrification rate and ammonia escape amount

显；当温度为 950~1100 K 时，氨逃逸量趋于稳定。因此，当反应温度约为 900 K 时，锅炉脱硝效果最佳。当炉膛温度过高时，相比于 NO 的还原反应，炉膛内 NH_3 发生的氧化反应占主导地位，从而导致脱硝效率降低至 70% 以下。

3.3 氨氮比的影响

氨氮比指脱硝过程中喷入还原剂与待脱除 NO_x 的当量比值，是影响 SNCR 反应脱硝效率的一个重要因素。控制还原剂雾化粒径为 $1\ \mu\text{m}$ 、雾化角度为 30° ，还原剂注入温度为 300 K，还原剂供给速度 $6\sim 7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，还原剂用量为 $0.0139\ \text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。分别设置氨氮比为 1、1.2、1.5、1.8、2，以研究不同氨氮比对脱硝效率的影响。由图 12 可知，随着氨氮比的增加，脱硝效率呈上升趋势。在氨氮比为 1.0~1.8 时，脱硝效率的上升幅度相对较平缓。而在氨氮比为 1.8~2.0 时，锅炉的脱硝效率上升幅度较陡。当氨氮比为 1.2 时，脱硝效率就已达到 70% 以上；当氨氮比为 2 时，脱硝效率高达 77.3%。

从氨逃逸来看，氨逃逸量呈上升趋势，当氨氮比为 1.5 时，氨逃逸量上升幅度增加。整体来看，随着氨氮比的增加，脱硝效率虽有所增加，但烟气脱硝效率仅有 70%~80%，因此，结合氨逃逸量来看，并非氨氮比越高越好。当氨氮比为 1.5 左右时，能控制氨逃逸量为 $1.7\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，脱硝效率为 71.9%，从而确保生物质锅炉烟气的脱硝效果呈最佳状态。

4 结论

1) 与单一生物质相比，混合燃料具有较高的固定碳含量和较低 N 含量。混合燃料有利于提升生物质锅炉的热效能，并减少污染物排放。

2) 不同生物质燃料燃烧过程的数值模拟结果表明，混合燃料燃烧效果好，炉膛内温度高达 140 K，烟气中 NO 排放的质量浓度最低，平均值为 $369.2\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；混合燃料的 SO_2 排放浓度介于小麦秸秆与果木枝、树皮间， SO_2 生成量与燃料种类没有明显相关性；混合燃料的 CO 生成量较低、 CO_2 的生成量最高。在烟气中， CO_2 排放量较高，降低生物质锅炉碳排放仍是值得关注的问题之一。

3) 以农林混合生物质燃料为研究对象，通过数值模拟探究了生物质锅炉 SNCR 影响因素。最佳条件为：将还原剂喷枪位置设置在 8~11 m；还原剂喷嘴数量设置为 10 个；当反应温度约 900 K、氨氮比为 1.5，SNCR 脱硝率高达 78.7%，NO 排放质量浓度最低为 $78.7\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

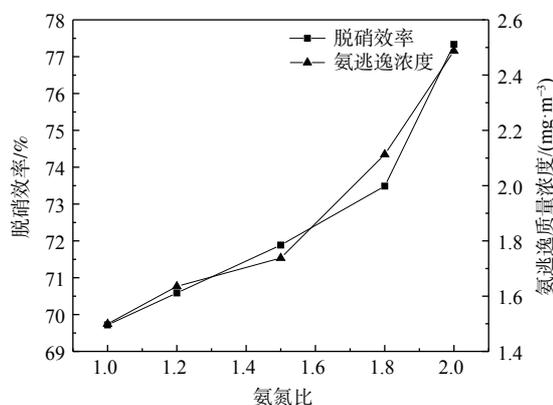


图 12 氨氮比对脱硝率和氨逃逸的影响

Fig. 12 Effect of ammonia nitrogen ratio on denitrification rate and ammonia escape amount

参考文献

- [1] BUI Q, WANG Z H, ZHANG B, et al. Revisiting the biomass energy-economic growth linkage of BRICS countries: a panel quantile regression with fixed effects approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316: 128382.
- [2] SIKKEMA R, PROSKURINA S, BANJA M, et al. How can solid biomass contribute to the EU's renewable energy targets in 2020, 2030 and what are the GHG drivers and safeguards in energy and forestry sectors[J]. *Renewable Energy*, 2021, 165: 758-772.
- [3] VIJAY V, SUBBARAO P M V, CHANDRA R. An evaluation on energy self-sufficiency model of a rural cluster through utilization of biomass residue resources: a case study in India[J]. *Energy and Climate Change*, 2021, 2: 100036.
- [4] 周舜, 胡曼曼, 马明超, 等. 生物质锅炉烟气处理方法的研究[J]. *节能与环保*, 2020(7): 76-77.
- [5] 郭思柯. 生物质锅炉内燃烧与轰燃特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [6] ZHANG X H, CHEN Q, BRADFORD R, et al. Experimental investigation and mathematical modelling of wood combustion in a moving grate boiler[J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(11): 1491-1499.
- [7] BALETA J, MIKULCIC H, VUJANOCIC M, et al. Numerical simulation of urea based selective non-catalytic reduction DeNO_x process for industrial applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016(125): 59-69.
- [8] MOUSAVI S M, FATEHI H, BAI X S. Numerical study of the combustion and application of SNCR for NO_x reduction in a lab-scale biomass boiler[J]. *Fuel*, 2021, 293: 120154.
- [9] 胡小翠. 生物质锅炉燃烧数值模拟[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- [10] 李穹. 循环流化床锅炉SNCR脱硝关键技术开发[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [11] 陆燕宁. 生物质炉排炉燃烧过程的CFD数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [12] 赵文霞, 杨朝旭, 刘帅, 等. 典型农作物秸秆组成及燃烧动力学分析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(4): 921-927.
- [13] 余有芳, 尚鹏鹏, 盛奎川. 生物质燃烧烟气排放特性与污染物控制[J]. *农业工程*, 2017, 7(2): 50-54.
- [14] 白兆兴. 生物质锅炉技术现状与存在问题[J]. *工业锅炉*, 2008(2): 29-32.
- [15] MILTNER M, MAKARUK A, HARASEK M, et al. CFD-Modelling for the combustion of solid baled biomass[J]. *Parameters: Journal of the US Army War College*, 2006, 1: 1-6.
- [16] 马毓聪. 生物质燃料燃烧NO排放特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [17] JODAL M, NIELSEN C, HULGAARD T, et al. Twenty-third symposium (international) on combustion[J]. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1990: 237-243.
- [18] 唐慧雪. 尿素法SNCR反应机理分析及脱硝中试试验的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [19] 宋顺鑫. 大型链条炉SNCR脱硝试验及数值模拟[D]. 杭州: 中国计量学院, 2015.
- [20] 王赞娥. 采用SNCR技术炉内燃烧及脱硝反应过程的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

(责任编辑: 靳炜)

Flue gas emission characteristics and SNCR denitrification numerical simulation of agro-forestry biomass boiler

ZHAO Wenxia*, CHAI Ziru, BIAN Yonghuan, ZHAO Yu, WANG Shixin, JIAO Zhijie

College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China

*Corresponding author, E-mail: kd2010zwx@163.com

Abstract Biomass boiler of typical biomass power plant in Hebei Province is taken as the research object. On the basis of analyzing the composition of agricultural and forestry biomass fuel, FLUENT software is used to conduct numerical simulation of flue gas emission characteristics and SNCR denitration performance of biomass boiler. The results showed that, compared with single biomass, the mixture of wheat straw, fruit wood branch and bark with a ratio of 0.3:0.4:0.3 have lower nitrogen content (0.39%). The average emission concentration of NO in flue gas of different biomass fuels after boiler combustion is in the order of wheat straw (503.6 mg·m⁻³) > fruit wood branch > bark > mixed fuel (369.2 mg·m⁻³); SO₂: wheat straw > mixed fuel > bark > fruit wood branch; CO: bark > wheat straw > mixed fuel > fruit wood branch. CO₂: mixed fuel > fruit wood branch > bark > wheat straw. Numerical simulation of SNCR denitrification shows that when the height of reducing agent (urea) nozzles is set between 8 m and 11 m, the number of nozzles is 10, the reaction temperature is about 900 K, and the ammonia nitrogen ratio is 1.5, the SNCR denitrification rate is up to 78.7%, and the NO emission concentration is the lowest (78.7 mg·m⁻³). The results show that the mixed agroforestry biomass fuel has better combustion performance, and the NO concentration generated by combustion is the lowest. Under the condition of meeting the optimal SNCR process operating parameters, NO is easier to achieve the requirements of low emissions.

Keywords biomass fuel; fuel composition; flue gas composition; numerical simulation; SNCR